مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک با استفاده از مفهوم انرژی★

مرتضی جلیلی قاضی‌زاده (۱) امیر کاووسی (۲) علی‌اصغر صادقی (۳) حمید فرهاد (٤)

چکیده *در این پژوهش به بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک پرداخته شده است. پس از ارزیابی خصوصیات سربارهٔ فولادی، پنج سری مخلوط آسفالتی با درصدهای وزنی مختلف سرباره (جایگزین بخش درشت‌دانهٔ مصالح آهکی) تهیه شد. با استفاده از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، رفتار خستگی مخلوط‌ها در حالت کرنش کنترل شده ارزیابی شد. سپس با استفاده از عمرخستگی‌های به‌دست‌آمده، مدل‌های پیش‌بینی عمرخستگی توسعه داده شد. همچنین مدل خستگی بر اساس نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی و بر پایه‌ی مفهوم انرژی شکست ارائه گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از سرباره، منجر به بهبود رفتار خستگی مخلوط آسفالتی می‌شود. همچنین مدل‌های توسعه داده شده دقت خوبی در پیش‌بینی عمرخستگی دارد. مدل به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی نیز نشان داد که می‌توان از پارامتر انرژی شکست برای تعیین عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره استفاده نمود.*

واژه‌های کلیدی مخلوط آسفالتی، سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک، مدل خستگی، انرژی شکست.

Development of Fatigue Predictive Models for Asphalt Concrete Mixes Containing Electric Arc Furnace Steel Slag Based on Fracture Energy Concept

M. Jalili Qazizadeh A. Kavussi A. Sadeghi H. Farhad

Abstract *This research was conducted in order to evaluate fatigue resistance properties of asphalt mixtures containing Electric Arc Furnace (EAF) steel slag. After evaluating properties of EAF steel slag, five sets of mixtures were prepared in laboratory. Each set consisted of a combination of a control limestone aggregate mixed with a specific amount of EAF steel slag. Four points bending beam fatigue testing was performed on all mixtures (at strain controlled mode). Based on fatigue lives, fatigue predicting models were developed. Moreover, a fatigue prediction model which was obtained from indirect tensile test, resilient modulus and was based on fracture energy was developed. The results showed that the inclusion of EAF in mixtures improved fatigue life of mixtures considerably. Very good correlations were observed between responses and fatigue life of mixtures. In addition, models based on fracture energy (DE_f/DE_{IDT}) predicted fatigue life of mixtures containing EAF materials reasonably well.*

Key Words Asphalt mixture, EAF slag, Fatigue model, Fracture energy.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹٦/٥/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان.

(۲) استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

(۳) استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری.

(٤) نویسندهٔ مسئول، مربی، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربت‌حیدریه.

Email: h.farhad@torbath.ac.ir

مقدمه

سربارهٔ فولادی یکی از محصولات فرعی صنایع فولاد است که می‌توان به‌عنوان مصالح سنگی در لایه‌های روسازی مورد استفاده قرار گیرد. سربارهٔ کورهٔ اکسیژنی (BOF) و سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک (EAF) دو نوع متداول از سرباره است که در لایه‌های آسفالتی استفاده می‌شود [1-3]. سالانه بیش از ۳ میلیون تن سربارهٔ فولاد در ایران تولید می‌شود که بیش از ۵۰٪ آن را سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک تشکیل می‌دهد. برخی از مزایای سرباره نسبت به مصالح سنگی متداول در روسازی، عبارت است از: مقاومت بیشتر در برابر سایش، شکستگی بیشتر و بافت زبرتر که منجر به برتری نسبی این مصالح شده است. بااین‌وجود یکی از معایب استفاده از سرباره در لایه‌های روسازی، پتانسیل افزایش حجم آن به دلیل وجود عناصر آزاد منیزیم و آهک است [4].

ترک‌خوردگی خستگی یکی از خرابی‌های مهم در روسازی‌های آسفالتی است. حداکثر کرنش افقی در زیر لایهٔ آسفالتی به‌عنوان معیار کنترل کنندهٔ ترک خستگی در روسازی آسفالتی به کار می‌رود. پس از عبور هر بار از روی سطح روسازی، تنش فشاری افقی در نیمهٔ بالایی لایهٔ آسفالتی و تنش کششی افقی در نیمهٔ پایینی لایهٔ آسفالتی ایجاد می‌شود. پس از تکرار بارگذاری، کرنش حاصل از این تنش‌ها سرانجام منجر به ترک‌خوردگی خستگی در روسازی خواهد شد [5].

عملکرد مخلوط آسفالتی تابع خصوصیات مصالح سنگی نظیر شکل، بافت سطحی، دانه‌بندی، مدول و خصوصیات قیر نظیر نرمی، درجهٔ نفوذ، کندروانی، چسبندگی، سختی و ... است. همچنین، اندرکنش میان قیر و مصالح سنگی در مخلوط تأثیر بسزایی در خصوصیات مخلوط آسفالتی خواهد داشت [6]. عملکرد خستگی نیز به‌شدت تحت تأثیر نوع مصالح سنگی تغییر می‌کند [7].

پیش‌بینی دقیق عمرخستگی مخلوط آسفالتی به دلیل پیچیدگی پدیدهٔ خستگی تحت شرایط مختلف بارگذاری، محیطی و مصالح، بسیار مشکل است. در دهه‌های گذشته، مطالعات زیادی در خصوص مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس نتایج آزمایشگاهی و میدانی انجام شده است. بااین‌وجود، پژوهش‌های کمی در خصوص مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره صورت گرفته است؛ بنابراین، یکی از اهداف این پژوهش، توسعهٔ مدل خستگی مخلوط آسفالتی حاوی سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک است. از طرف دیگر، ازآنجایی که انجام آزمایش خستگی بسیار زمان‌بر و پرهزینه است، در این تحقیق سعی شده است مدلی بر پایهٔ انرژی شکست با استفاده از نتایج آزمایش‌های کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی، ارائه گردد.

پیشینهٔ تحقیق

با وجود این‌که مطالعات پیشین به نقش مؤثر سربارهٔ فولاد در بهبود مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های ماندگار اشاره دارد؛ اما تحقیقات کمی در خصوص رفتار خستگی این مخلوط‌ها انجام شده است که نتایج این مطالعات کم نیز بعضاً ضدونقیض است.

نتایج مطالعه‌ای که در زمینهٔ جایگزینی ریزدانهٔ مخلوط با سرباره انجام شده است؛ نشان داد که سختی و خصوصیات کششی مخلوط حاوی سرباره نسبت به مخلوط شاهد افزایش می‌یابد [8]. همچنین تحقیقات آنها نشان داد که ترکیبی از درشت‌دانه سربارهای و مصالح درشت‌دانهٔ آهکی منتج به عمرخستگی بیشتر مخلوط آسفالتی خواهد شد. در پژوهشی دیگر، با جایگزینی مقادیر مختلف سرباره (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) به‌جای درشت‌دانهٔ آهکی در مخلوط، به این نتیجه دست یافتند که جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانه با سرباره می‌تواند منجر به

بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی گردد [9]. هرچند دلایل منطقی در خصوص این تغییرات، ارائه نشده است. مطالعاتی دیگر در ایتالیا در خصوص امکان استفاده از دو نوع سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک نشان داد که در سطح تنشی مشخص، با افزایش سختی، مقادیر تغییر شکل، کاهش و در نتیجه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی افزایش می‌یابد و عمرخستگی مخلوط در قیاس با نمونه‌های شاهد افزایش می‌یابد [10,11].

خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی حاوی سرباره و مصالح دورریز در تحقیقی دیگر مورد بررسی قرار گرفت [12]. در این مطالعه، سه نوع مصالح سنگی شامل سرباره، داسیت و بتن بازیافتی مورد استفاده قرار گرفت و یافته‌های آنها نشان داد که عمرخستگی مخلوط-های حاوی سرباره به‌طور قابل توجهی بیشتر از مخلوط آسفالتی متداول است [12].

در پژوهشی دیگر [13] با مقایسهٔ عمرخستگی مخلوط آسفالتی حاوی درصدهای مختلف سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک توسط آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در حالت تنش کنترل شده و در دو وضعیت پیرشده و پیرنشده، نشان دادند که با افزودن سرباره عمرخستگی مخلوط آسفالتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و همچنین حساسیت نسب به پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سربارهٔ قوس الکتریک در قیاس با مخلوط آهکی، کمتر است.

روش تحقیق

در این تحقیق به‌منظور بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های حاوی سرباره، بخش درشت‌دانهٔ مصالح سنگی آهکی به ترتیب با ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد (وزنی) سربارهٔ نوع EAF جایگزین گردید. با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال بر اساس استاندارد ASTM D-6927 درصد قیر بهینه و سایر مشخصات فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌ها به دست آمد، سپس ٤٥ تیرچه جهت آزمایش خستگی به روش تیرچهٔ خمشی و ۱۵ نمونهٔ استوانه‌ای با ابعاد نمونه-های مارشال جهت آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی، تهیه شد. سپس آزمایش خستگی در حالت کرنش کنترل شده در سه سطح کرنش (۸۰۰، ۷۰۰ و ۵۰۰) و آزمایش کشش غیرمستقیم در دمای ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد، انجام و با استفاده از روش‌های آماری، تحلیل و با یکدیگر مقایسه گردید. سپس از این نتایج برای مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره استفاده گردید.

مواد و مصالح مصرفی

در این پژوهش از یک نوع سنگ‌دانهٔ آهکی، یک نوع سربارهٔ فولادی EAF (تولید کارخانهٔ فولاد مبارکهٔ اصفهان) و از قیر ۷۰-٦۰ به‌منظور ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است. همچنین در تمامی مخلوط‌ها از پودر سنگ آهک به‌عنوان فیلر استفاده گردید. دانه‌بندی مصالح سنگی منطبق بر منحنی دانه‌بندی شمارهٔ ٤ (با حداکثر اندازه‌ی اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر) آیین‌نامهٔ روسازی آسفالتی راه‌های ایران انتخاب شد [١٤]. به‌منظور امکان قیاس مخلوط‌ها با یکدیگر، مصالح سنگی به‌گونه‌ای انتخاب گردید که منحنی دانه‌بندی هر سه نوع مخلوط دقیقاً بر یکدیگر منطبق باشد. مشخصات مصالح سنگی آهکی، سرباره و قیر مصرفی در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است.

همچنین به‌منظور تعیین عناصر و ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای آزمایش XRF انجام شد که نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای

مشخصه	استاندارد	مصالح آهکی			سرباره کوره قوس الکتریک (EAF)
		درشت‌دانه	ریزدانه	فیلر	درشت‌دانه
وزن مخصوص (g/cm^3)	ASTM C-127	۲/۶۵۶			۳/۰۵۵
وزن مخصوص (g/cm3)	ASTM C-128		۲/۵۸۲		
وزن مخصوص (g/cm3)	ASTM D-854			۲/۷۶۸	
درصد جذب آب		۱/۶۰	۱/۹۰		۱/۸۵
سایش لس‌آنجلس (٪)	ASTM C-131	۲۰/۴			۱۳/۴
شکستگی در دو وجه (٪)	ASTM D-5821	۸۰			۹۸

جدول ۲ مشخصات قیر مورد استفاده

نام آزمایش	استاندارد آشتو	نتیجه
وزن مخصوص قیر	T-228	۱/۰۱۳
درجه نفوذ (سانتی‌گراد)	T-49	۶۳/۷
نقطه نرمی (سانتی‌گراد)	T-53	۵۱/۷
کندروانی کینماتیکی در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد (mm^2/s)	T-201	۶۸۸
شکل‌پذیری (سانتی‌متر)	T-51	>۱۰۰
نقطه اشتعال (سانتی‌گراد)	T-48	۲۸۹

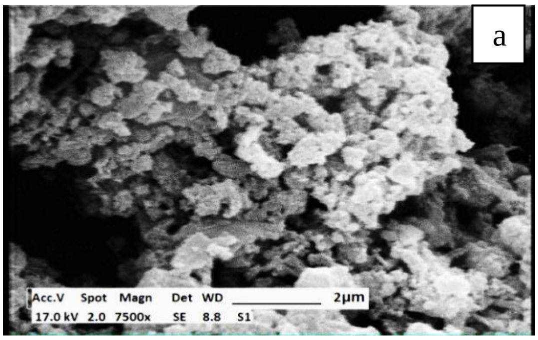
جدول ۳ نتایج تحلیل XRF مصالح سنگی

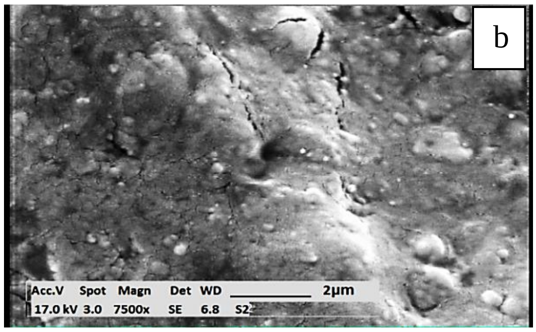
	درصد اکسید											
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Sr	Na_2O	MnO	V
مصالح آهکی	۵/۵۶۵	۰/۶۷	۰/۳۷۶	۴۵/۷۸۶	۵/۷۰۱	۰/۱۷۵	---	۰/۰۵۶	۰/۰۲۴	---	---	---
EAF	۱۷/۴۶۷	۴/۰۷۳	۲۵/۷۵۱	۳۸/۸۶۷	۵/۰۱۳	۰/۲۴۸	۲/۱۱۱	۱/۵۰۲	۰/۰۳۴	۰/۳۳۷	۲/۳۲۳	۰/۶۸۷

همان‌گونه که نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد، مهم‌ترین فازها و ترکیبات تشکیل‌دهندهٔ مصالح سنگی آهکی، همان‌طور که از نامش پیداست، اکسید کلسیم است و در مورد سربارهٔ فولاد کورهٔ قوس الکتریک عبارت‌اند از: اکسید کلسیم (کلسیت)، اکسید آهن، کوارتز، مگنتیت و اکسید آلومینیم. حضور اکسید آهن و آلومینیوم به همراه دیگر عناصر فلزی در ترکیبات سربارهٔ دلیل اصلی مقاومت زیاد مصالح سرباره‌ای در برابر سایش است. نسبت SiO_2/CaO نشانه‌ای از خصوصیت بازی مصالح سنگی است و تضمینی برای چسبندگی مناسب مصالح سنگی با قیر، بدین ترتیب که با کاهش این نسبت چسبندگی بهتر صورت می‌گیرد که در هر دو نوع مصالح این نسبت بالاست.

به‌منظور بررسی سطح، سایز حفرات و ساختار کریستالی سنگ‌دانه‌های سربارهٔ فولاد و مقایسه‌ی آن‌ها با سنگ‌دانه‌های آهکی، از میکروسکوپ الکترونی SEM استفاده شد. در این نوع میکروسکوپ، الکترون به سطح نمونه تابیده شده و سپس منعکس می‌گردد و توسط شناساگرها جمع‌آوری و تبدیل به فوتون نوری می‌گردد تا تصویر مرئی ایجاد شود؛ به‌عبارت‌دیگر، این نوع

میکروسکوپ فقط از ساختار سطحی تصویر می‌دهد. تصاویر گرفته شده با این روش، در شکل (۱) برای مصالح سنگی آهکی و سربارهٔ نوع EAF نشان داده شده است.





شکل ۱ مقایسهٔ بافت سطحی سنگ‌دانه‌ها با استفاده از تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی (a: EAF، b: سنگ‌دانهٔ آهکی)

در این آزمایش از سنگ‌دانه‌هایی با اندازهٔ اسمی ٤/٧٥ میلی‌متر استفاده شد. بر اساس این تصاویر سرباره‌های فولاد دارای سطح و بافت زبرتر و درشت‌تر در مقایسه با سنگ‌دانه‌های آهکی است که منجر به پیوستگی بهتری با قیر خواهد شد.

طرح اختلاط

نمونه‌های آزمایش مارشال بر اساس استاندارد ASTM D-6926 ساخته شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از منحنی دما- کندروانی قیر، دمای اختلاط و تراکم تعیین گردید. نمونه‌ها پس از اختلاط در دمای ١٤٥ درجهٔ سانتی گراد، با ٧٥ ضربه‌ی مارشال به هر دو طرف نمونه‌های ١٠٢ میلی‌متری به‌منظور در نظر گرفتن شرایط ترافیکی سنگین، در دمای ١٣٥ درجه سانتی‌گراد متراکم گردید. در این آزمایش در مجموع ٩٠ نمونه با درصدهای مختلف (٢٥، ٥٠، ٧٥، ١٠٠ درصد درشت‌دانه) سربارهٔ نوع EAF که جایگزین بخش درشت‌دانهٔ مصالح آهکی شده بود، بر حسب درصدهای مختلف قیر تهیه گردید. برای نام‌گذاری نمونه‌های حاوی سرباره از حرف E و برای نمونه‌های حاوی مصالح آهکی از حرف L استفاده شده است. همچنین درصد جایگزینی سرباره به‌جای درشت‌دانهٔ مخلوط پس از خط تیره نشان داده شده است. پس از ساخت، وزن مخصوص واقعی نمونه‌های متراکم شده، اندازه‌گیری شد. استقامت و روانی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D-6927 با استفاده از دستگاه آزمایش مارشال اندازه‌گیری گردید که نتایج آن در جدول (٤) ارائه شده است.

جدول ٤ خلاصه نتایج طرح اختلاط مارشال

نوع نمونه	درصد قیر بهینه	استقامت مارشال (kN)	وزن مخصوص توده‌ای (G_{mb})	درصد جذب آب	درصد قیر جذب‌شده (P_{ba})	VMA	VFA
E-25	٤/٧	١١/٧	٢/٤٣	٠/٣٦	٠/٣٨	١٥/٢	٧٠
E-50	٤/٩	١٣/١	٢/٤٩	٠/١٣	٠/٥٨	١٦/٤	٧٤
E-75	٥/٠	١٣/٧	٢/٥٤	٠/٢٥	٠/٨٤	١٦/١	٧٥
E-100	٥/٢	١٤/٠	٢/٥٧	٠/٢٦	٠/٩٩	١٧/٠	٧٥
L	٤/٦	١٠/٨	٢/٣٧	٠/٥٣	٠/٢٦	١٤/٦	٧٠

نتایج آزمایش مارشال برای هر ۵ سری مخلوط نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین درصد قیر بهینه به ترتیب مربوط به مخلوط حاوی مصالح آهکی و مخلوط با ۱۰۰٪ درشت‌دانهٔ سرباره‌ای است. افزایش درصد قیر این مخلوط‌ها می‌تواند به دلیل خلل و فرج موجود در سنگ‌دانه‌های سرباره‌ای باشد. با افزایش نسبت مصالح سرباره‌ای، استقامت مارشال نمونه‌های آسفالتی افزایش یافته است. البته با افزودن تا ۲۵ درصد سرباره به مخلوط آسفالتی، افزایش استقامت مارشال، چندان قابل ملاحظه نبوده ولی با جایگزین کردن مقادیر بیشتر (حداقل ۵۰ درصد مصالح آهکی با مصالح سرباره‌ای) به دلیل درگیری و قفل و بست مؤثر سنگ‌دانه‌ها، این پارامتر به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد به‌گونه‌ای که با جایگزین شدن کل بخش درشت‌دانهٔ مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره‌ای، استقامت مارشال مخلوط آسفالتی حدود ٤٠ درصد افزایش پیدا کرده است. استقامت مخلوط آسفالتی به دو عامل اصطکاک داخلی و چسبندگی بستگی دارد [١٥]. اصطکاک بین دانه‌های مصالح سنگی در درجهٔ اول بستگی به زبری سطح دانه‌ها و قفل و بست و جنس آن‌ها و در درجهٔ دوم بستگی به دانه‌بندی و حداکثر قطر دانه‌ها دارد. مقدار قیر مصرفی نیز بر اصطکاک بین دانه‌های سنگی اثر می‌گذارد به‌این‌ترتیب که با اضافه شدن مقدار قیر، ضخامت قیر در محل اتصال دانه‌ها افزایش یافته و موجب کم شدن اصطکاک می‌گردد. زبری سطح دانه‌ها موجب می‌شود که استقامت مخلوط آسفالتی با افزایش مقدار قیر، کمتر کاهش یابد. بنابراین هرچه سطح دانه‌ها زبرتر باشد، تقلیل استقامت آسفالت با افزایش مقدار قیر به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر خواهد بود [١٦].

کارهای آزمایشگاهی

آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی به روش تئوری لایه‌ای است. اکثر مصالح مورد استفاده در لایه‌های روسازی الاستیک کامل نبوده و بعد از هر سیکل بارگذاری، مقداری تغییر شکل ماندگار خواهد داشت [17]. بااین‌وجود اگر مقدار بار در قیاس با مقاومت مصالح کم باشد و به‌دفعات تکرار شود، تغییر شکل‌ها، تقریباً برگشت‌پذیر بوده و با بار وارده متناسب خواهد بود. تحت این شرایط، مصالح روسازی را می‌توان به‌عنوان مصالح الاستیک در نظر گرفت [18].

برای انجام آزمایش مدول برجهندگی، به ازای هر ترکیبی از مصالح سنگی و سرباره‌ای، حداقل سه نمونه در دو وضعیت (با تغییر ۹۰ درجه‌ای نمونه) و در دمای ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد مطابق روش استاندارد ASTM D 4123، مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش نمونه تحت بار نیمه سینوسی با فرکانس ۱ Hz و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه بارگذاری گردید. با استفاده از رابطهٔ (۱) می‌توان ضریب برجهندگی را به دست آورد:

$$M_r = \frac{P(\upsilon+0.27)}{t\delta_h} \qquad (۱)$$

در این رابطه، P حداکثر بار دینامیکی (N)، υ ضریب پواسون (۰/۳۵)، t ضخامت نمونه (mm) و δ_h مجموع تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر افقی است.

برای انجام این آزمایش از دستگاه UTM-14P استفاده شد. قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت حداقل ٦ ساعت در دمای ۲۰ درجه قرارداده شد. در مجموع ۱۵ نمونه برای این آزمایش ساخته شد.

آزمایش کشش غیرمستقیم (تعیین دانسیته انرژی شکست)

جهت تعیین رفتار کششی مخلوط آسفالتی که می‌تواند به مقاومت روسازی در برابر ترک‌خوردگی مرتبط شود، از آزمایش کشش غیرمستقیم استفاده می‌شود [19]. در این آزمایش، نمونهٔ استوانه‌ای به‌صورت خوابیده بین فک‌های بارگذاری دستگاه بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد (این بارگذاری فشاری سبب ایجاد تنش نسبتاً یکنواختی در صفحه‌ی قائم خواهد شد که معمولاً گسیختگی هم در

امتداد همین صفحه اتفاق می‌افتد [20]). سپس نمونه تحت بار قرارگرفته و بار با نرخ تغییر شکل ثابت ۵۰mm/min به آن اعمال می‌گردد و بارگذاری تا زمان گسیختگی نمونه ادامه می‌یابد. این آزمایش در دمای ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد انجام و جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها از رابطهٔ (۲) استفاده شد:

$$S_t = \frac{2P}{\pi.t.D} \qquad (۲)$$

که در آن:

D: قطر نمونه (m)،t: ضـــخامت نمونه (m)،P: حداکثر بار (kN) و S_t: مقاومت کششی (kPa) است.

با توجه به این‌که آزمایش تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از دستگاه UTM-14P انجام شد، بنابراین امکان ثبت تنش و کرنش در هر لحظه فراهم بود. لذا با استفاده از این مطلب امکان ترسیم منحنی تنش و کرنش و محاسبهٔ چقرمگی (Toughness) نمونه‌ها وجود داشت.

طبق تعریف، سطح زیر نمودار تنش-کرنش تا لحظهٔ گسیختگی (حداکثر تنش کششی) معرف چقرمگی مخلوط است که نشان‌دهندهٔ انرژی لازم جهت گسیختگی نمونه است و از رابطهٔ (۳) به دست می‌آید:

$$FE = \int_0^{\varepsilon_f} s(\varepsilon)d\varepsilon \qquad (۳)$$

که در آن:

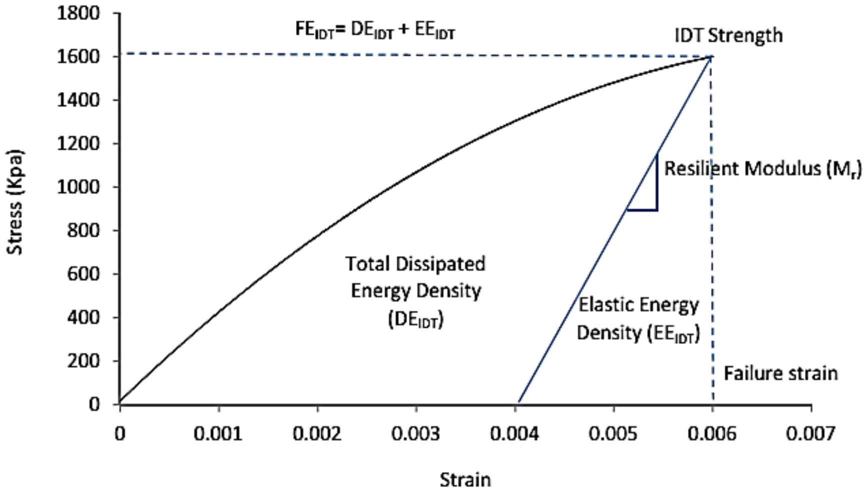
FE: انرژی تا لحظهٔ شکست (چقرمگی) و ε_f: کرنش در لحظهٔ گسیختگی است.

به این سطح همچنین، دانسیتهٔ انرژی شکست (Fracture Energy Density) می‌گویند. دانسیتهٔ انرژی شکست که به‌عنوان سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا نقطهٔ حداکثر منحنی، تعریف می‌شود، انرژی پتانسیل لازم برای ایجاد ترک است. از این مفهوم می‌توان برای بررسی عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمود، زیرا با استفاده از این مفهوم می‌توان وضعیت تنش و کرنش را توسط یک پارامتر تا لحظهٔ شروع ترک‌خوردگی در نظر گرفت [21]. در شکل (۳) نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش که از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی مخلوط آسفالتی به‌دست‌آمده، نشان داده شده است.

دانسیتهٔ انرژی شکست (FE_{IDT}) ، حاصل مجموع دانسیتهٔ انرژی کرنش الاستیک (EE_{IDT}) (Elastic Strain Energy Density) و دانسیتهٔ انرژی کرنش خزشی تلف‌شدهٔ کل (DE_{IDT}) (Dissipated Creep Strain Energy) است. مفهوم دانسیتهٔ انرژی کرنش خزشی تلف‌شده (DE_{IDT}) اولین بار توسط دو محقّق ارائه گردید [22,23]. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است FE_{IDT} سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا لحظهٔ گسیختگی است. درحالی‌که EE_{IDT} مساحت قسمتی از زیر منحنی تنش-کرنش است که توسط کرنش در لحظهٔ گسیختگی (ε_f)، ضریب برجهندگی (M_r) و مقاومت کششی غیرمستقیم (σ_{IDT}) شکل می‌گیرد. در واقع DE_{IDT} تفاوت بین FE_{IDT} و EE_{IDT} است [21]. محاسبه‌ی DE_{IDT} وابسته به نتایج ضریب برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم خواهد بود که از رابطهٔ (٤) به‌دست می‌آید:

$$DCSE_{IDT} = FE\text{-}EE \qquad (٤)$$

در تحقیقی [21] نشان دادند که DE_{IDT} با عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی همبستگی بسیار زیادی دارد. بدین ترتیب که به‌ازای سطح کرنشی مشخص، مخلوطی که DE_{IDT} بزرگ‌تری دارد، عملکرد خستگی بهتری نیز خواهد داشت. همچنین این محققین بیان داشتند که DE_{IDT}، یکی از خواص مهندسی منحصربه‌فرد مخلوط است که با مقاومت شکست مخلوط در ارتباط است [21].



شکل ٣ نمونه‌ای از منحنی تنش- کرنش در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش خستگی

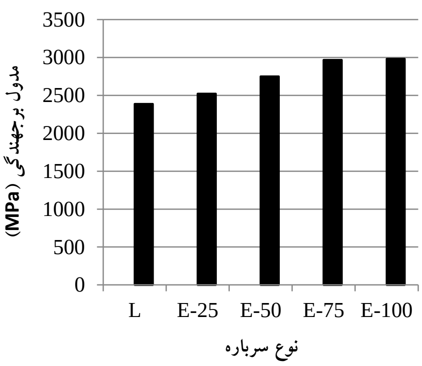
در این تحقیق برای انجام آزمایش خستگی از روش تیرچه خمش چهار نقطه‌ای مطابق روش استاندارد AASHTO T321-07 استفاده شد. تیرچه‌های این آزمایش با ابعاد ٥٠×٦٣×٣٨٠ میلی‌متر تهیه شد. سپس آزمایش خستگی در حالت کرنش کنترل شده و در سطوح کرنش ٥٠٠، ٧٠٠ و ٨٠٠ میکرو کرنش و تحت فرکانس بارگذاری ١٠ هرتز در دمای ٢٠ درجهٔ سانتی‌گراد انجام گردید. در هر سطح کرنش سه تیرچه مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین از بارگذاری سینوسی به دلیل تطابق بهتر با واقعیت [24] استفاده شد. دلیل انتخاب این سطوح کرنش قرارگیری عمرخستگی در محدودهٔ ١٠٠٠٠ تا ١٠٠٠٠٠٠ (که توصیهٔ اکثر استانداردهاست) است تا بتوان در مدل‌سازی استفاده نمود.

قبل از انجام آزمایش خستگی، درصد فضای خالی نمونه‌ها تعیین گردید تا تطابق آن‌ها با حدود پیشنهادی استاندارد کنترل شود. برای انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت حداقل ٦ ساعت در دمای ٢٠ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شد.

نتایج آزمایش‌ها و تحلیل نتایج

نتایج آزمایش مدول برجهندگی

در شکل (٤) نتایج آزمایش مدول برجهندگی مخلوط‌ها با درصدهای مختلف سرباره نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن سرباره منجر به افزایش ضریب برجهندگی نسبت به نمونهٔ شاهد (نمونهٔ حاوی مصالح آهکی) شده است. افزایش ضریب برجهندگی می‌تواند به دلیل شکستگی بیشتر سرباره و در نتیجه قفل و بست بیشتر مصالح سنگی باشد.



شکل ٤ میانگین ضریب برجهندگی نمونه‌ها در دمای ٢٠ ^oC

به‌منظور بررسی معنی‌داری نتایج آزمایشگاهی از تحلیل‌های آماری استفاده گردید. هدف از انجام تحلیل-های آماری، بررسی این موضوع است که تغییر در پارامترهای آزمایش‌ها ناشی از خطاهای آزمایشگاهی است و یا به دلیل حضور سرباره است. بدین منظور تحلیل‌های آماری ANOVA در سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی پارامترهای آزمایش انجام گردید. نتایج زمانی معنی-دار خواهد بود که مقدار P value کمتر از ۰/۰۵ باشد. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که در دمای ۲۰ درجهٔ سانتی-گراد، تفاوت میان مقادیر ضریب برجهندگی نمونه‌های حاوی ۵۰٪ یا بیشتر سرباره‌ها با نمونهٔ شاهد، معنی‌دار است بدین مفهوم که تفاوت در مقادیر ضریب برجهندگی ناشی از افزودن سرباره است.

نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم و تعیین دانسیتهٔ انرژی شکست

در جدول (۵) نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌ها، شامل: حداکثر مقاومت کششی، سطح زیر نمودار تنش–کرنش تا لحظهٔ گسیختگی و دانسیتهٔ انرژی کرنش خزشی تلف‌شدهٔ کل نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف سرباره ارائه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش درصد سرباره در مخلوط، حداکثر مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که حداکثر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های E-100 نسبت به نمونهٔ شاهد حدود ۲۰٪ افزایش یافته است. یافته‌های این آزمایش با نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق آسی و همکاران [9]، مطابقت خوبی دارد با این تفاوت که در تحقیق مذکور، بیشترین مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به نمونهٔ با ۲۵٪ سرباره بوده و توجیه منطقی در این خصوص نیز ارائه نشده است. همچنین با افزودن سرباره به مخلوط آسفالتی، سطح زیر منحنی تنش–کرنش (چقرمگی) نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش میزان چقرمگی برای نمونه E-100 به حدود ۳۰٪ می‌رسد.

مقادیر میانگین دانسیتهٔ انرژی تلف‌شدهٔ کل نمونه‌ها نسبت به نمونهٔ شاهد نشان می‌دهد که با افزودن سرباره، دانسیتهٔ انرژی تلف‌شدهٔ کل مخلوط افزایش می‌یابد. مقادیر بیشتر دانسیتهٔ انرژی تلف‌شدهٔ کل معیاری است که نشان‌دهنده‌ی مقاومت در برابر ترک‌های خستگی است. بدین مفهوم که با افزایش این پارامتر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی افزایش می‌یابد و به‌عبارت‌دیگر عمرخستگی مخلوط، افزایش خواهد یافت؛ بنابراین با افزودن هر دو نوع سرباره به مخلوط و در نتیجه افزایش دانسیتهٔ انرژی تلف‌شدهٔ بیشتر، می‌توان انتظار داشت که این مخلوط‌ها عمرخستگی بیشتری نسبت به نمونهٔ شاهد خواهد داشت. مقادیر دانسیتهٔ انرژی تلف‌شدهٔ کل به‌دست‌آمده از این آزمایش با نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق ژی و همکارانش[25] مطابقت دارد. در تحقیق مذکور نشان دادند که مخلوط‌های حاوی سرباره دانسیتهٔ انرژی تلف‌شدهٔ کل بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی مصالح بازالتی دارد.

به‌طورکلی همان‌طور که نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می‌دهد با افزودن سرباره به مخلوط، حداکثر مقاومت کششی غیرمستقیم، چقرمگی و دانسیتهٔ انرژی تلف‌شدهٔ کل مخلوط نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش می‌یابد. این مطلب می‌تواند ناشی از شکستگی بیشتر مصالح سرباره‌ای و درنتیجه قفل و بست بهتر مصالح سنگی و همچنین پیوند قوی‌تر قیر و مصالح سرباره‌ای باشد. چسبندگی مصالح سنگی و قیر نقش مهمی در گسیختگی و شکست مخلوط آسفالتی ایفا می-کند. مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی تابعی از چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی و همچنین چسبندگی قیر است؛ بنابراین با افزایش چسبندگی میان قیر و مصالح سنگی، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی افزایش خواهد یافت [26]. انرژی شکست بیشتر نمونه-های حاوی سرباره در قیاس با نمونهٔ شاهد نیز نشان‌دهندهٔ

نیروی لازم بیشتر برای ایجاد خرابی در این نوع مخلوط-هاست و نشان می‌دهد که افزودن مخلوط‌های حاوی سرباره سبب افزایش آستانه‌ی تحمل مخلوط قبل از ترک‌خوردگی شده و به‌بیان‌دیگر نیروی بیشتری برای ترک‌خوردگی آن لازم است.

به‌منظور بررسی تأثیر افزودن درصدهای مختلف سرباره بر نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، از تحلیل‌های آماری به روش تحلیل واریانس استفاده شد. تحلیل واریانس تعیین می‌نماید که آیا میانگین یک نمونه یا چند نمونه با نمونه‌های دیگر در سطح اهمیت در نظر گرفته شده، متفاوت است یا خیر. بااین‌وجود این روش تحلیل نشان نمی‌دهد که تفاوت معنادار آماری، مربوط به میانگین کدام نمونه یا نمونه‌ها است؛ بنابراین از آزمون-هایی نظیر توکی به همراه تحلیل واریانس به‌منظور تعیین این‌که میانگین کدام نمونه‌ها از نظر آماری متفاوت است، استفاده می‌شود. در آزمون توکی، همهٔ میانگین‌ها برای هریک از حالات بر حسب دامنه مرتب می‌شود. گروهی که کمترین میانگین را دارد، رتبهٔ یک را می‌گیرد. تفاوت-های جفتی بین میانگین‌ها که از بزرگ‌ترین میانگین و مقایسهٔ آن با کوچک‌ترین میانگین آغاز می‌شود، در هر گروه فهرست شده و به خطای استاندارد تقسیم می‌شود. این مقدار با یک مقدار بحرانی دامنهٔ استانداردشده مقایسه می‌شود. اگر این مقدار از مقدار بحرانی بیشتر باشد، آنگاه نتیجه گرفته می‌شود که ظهور در آن گروه، از لحاظ آماری متفاوت است. برای انجام تحلیل آماری از آزمون ANOVA در سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم استفاده شد. به‌این‌ترتیب که از این آزمون برای سنجش تأثیر تغییر درصدهای مختلف سرباره بر پارامترهای این آزمایش استفاده گردید. در جدول (٦) نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل واریانس برای نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم ارائه شده‌است.

نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که تفاوت معنی-داری بین مقادیر حداکثر مقاومت کششی نمونه‌های حاوی سرباره و نمونهٔ شاهد (به جزء نمونهٔ E-25) وجود دارد. همچنین این موضوع برای مقادیر چقرمگی (سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا لحظه گسیختگی) نمونه‌های حاوی ۷۵٪ یا بیشتر سرباره با نمونه شاهد وجود دارد. دانسیتهٔ انرژی تلف‌شدهٔ کل نمونه‌ها (به جزء نمونهٔ E-25) نیز با نمونهٔ شاهد تفاوت معنی‌داری دارد.

جدول ۵ خلاصه آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

نوع مخلوط	L	E-25	E-50	E-75	E-100
حداکثر تنش کششی (kPa)	٦۲۵	٦۹۳	۷۳۲	۷۵۰	۷۵٦
سطح زیر منحنی تا لحظهٔ گسیختگی (kPa)	٤۲٤	٤٤۰	۵۰۵	۵۲٤	۵٤٦
دانسیته انرژی کرنش خزشی تلف‌شده کل (DE_{IDT}) (kPa)	۳۲۲	۳۳٤	۳۸۸	٤۰٦	٤۳۷

جدول ٦ تحلیل واریانس نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها

نوع نمونه	مجموع مربعات (ss)	درجه آزادی (df)	F	P	آزمون توکی
حداکثر مقاومت کششی	۸۰٤۵۹	۱۰	۳/۵۰	۰/۰۰۲	به جزء نمونهٔ E-25
چقرمگی	۱۰۲۹۷۹	۱۰	۱۰/۷۸	۰/۰۰۰	به جزء نمونه‌های E-25 و E-50
دانسیته انرژی تلف‌شده کل	۱۰٤٤۲۹	۱۰	۱۲/٦٦	۰/۰۰۰	به جزء نمونهٔ E-25

نتایج آزمایش خستگی

در این پژوهش، جهت بررسی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، از دو روش به شرح ذیل استفاده شده است:

۱. با استفاده از رویکرد متداول پیشنهادی استانداردهای آزمایش خستگی، مبنی بر کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه.

۲. روش Rowe and Bouldin (R&B) [27]. در این روش با ترسیم نسبت سختی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری، عمر خستگی را می‌توان به ازای تعداد سیکلی که حداکثر مقدار نسبت سختی را نتیجه می-دهد تعیین نمود.

نتایج عمرخستگی نمونه‌ها در سطوح کرنش مختلف بر ا ساس روش (۱) و (۲) به ترتیب در جداول (۷) و (۸) ارائه شده است.

جدول ۷ نتایج عمرخستگی نمونه‌ها در سطوح کرنش مختلف بر اساس هر روش (۱)

نوع نمونه	بر اساس کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه		
	سطح کرنش		
	۸۰۰	۷۰۰	۵۰۰
L	۹۲٤۰	۳۱۲۹۰	۱۲۷۵۰۰
E-25	۱۷۱۲۳	۳۱۰٤۷	۲۷۹۳۵۳
E-50	۳۱۵۸۳	۵۰۷٤۰	۳۰۰٤٤۳
E-75	۳۰۳۵۳	٦٦٦۱۳	۲۹۲۰۸۳
E-100	٤۱۸۷۵	٦٦۸۳۰	٤۳۹۵۰۰

جدول ۸ نتایج عمرخستگی نمونه‌ها در سطوح کرنش مختلف بر اساس هر روش (۲)

نوع نمونه	بر اساس روش Rowe and Bouldin		
	سطح کرنش		
	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
L	۱٦٦۹۳	۱٦٦۹۳	۱٦٦۹۳
E-25	۲٦۸٤۰	۲٦۸٤۰	۲٦۸٤۰
E-50	٦۸۱۸۳	٦۸۱۸۳	٦۸۱۸۳
E-75	۷۰۵۰۷	۷۰۵۰۷	۷۰۵۰۷
E-100	۷۱۱٤۰	۷۱۱٤۰	۷۱۱٤۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد سرباره عمرخستگی نمونه‌ها بر اساس روش کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه، افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که عمرخستگی نمونه‌ها به‌طور میانگین در سطوح ریزکرنش ۸۰۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ به ترتیب حدود ۳، ۲ و ۲/۵ برابر نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش یافته است. همچنین به‌طور مشابه، عمرخستگی در سطوح کرنش مختلف بر اساس معیار R & B، با افزایش درصد سرباره، افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که با افزودن سرباره به مخلوط، عمرخستگی نمونه‌ها به‌طور میانگین در سطوح ریزکرنش ۸۰۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ به ترتیب حدود ۳، ۲/۵ و ۲/۸ برابر نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش یافته است. این افزایش عمر خستگی می‌تواند به دلیل چسبندگی بهتر مصالح سرباره-ای با قیر باشد که منجر به تقویت چسبندگی در محل تماس قیر و مصالح سنگی و در نتیجه جلوگیری از تغییر شکل و گسترش ترک‌خوردگی خواهد شد. همچنین همان‌طور که نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان داد با افزودن سرباره، چقرمگی مخلوط نیز نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش می‌یابد که این مطلب نیز می‌تواند منجر به مقاومت بیشتر نمونهٔ آسفالتی قبل از ترک‌خوردگی و در نتیجه افزایش عمرخستگی مخلوط شود.

جدول ۹ تحلیل واریانس نتایج عمرخستگی بر اساس معیار ۵۰٪ کاهش سختی خمشی اولیه در حالت پیرنشده

عمرخستگی	سطح تنش (kPa) یا کرنش (µs)	P	آزمون توکی
روش الف	۸۰۰	۰/۰۰۰	
	۷۰۰	۰/۰۰۹	به جزء E-25
	۵۰۰	۰/۰۰۰	
روش ب	۸۰۰	۰/۰۰۰	
	۷۰۰	۰/۰۰۲	به جزء E-25
	۵۰۰	۰/۰۰۰	

جدول (۹) تحلیل‌های آماری نتایج عمرخستگی‌های به‌دست‌آمده بر اساس هر دو معیار را، نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سطوح کرنش ۵۰۰ و ۸۰۰ میکرو کرنش اختلاف معنی‌داری بین عمرخستگی نمونه‌های مختلف با نمونهٔ شاهد مشاهده می‌شود اما در سطح کرنش ۷۰۰ اختلاف معنی‌داری برای نمونه‌های E-25 مشاهده نمی‌شود.

مدل‌سازی رفتاری خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره

مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی همواره به خاطر فراهم آوردن درکی بهتر از رفتار خستگی و همچنین امکان پیش‌بینی آن، مورد توجه محققین بوده است. مدل‌سازی رفتار خستگی علاوه بر آن‌که دید عمیق‌تری نسبت به نتایج به‌دست‌آمده و تفسیر آن‌ها فراهم می‌سازد، درصورتی‌که مدل ارائه شده دقت و اطمینان مناسبی داشته و دربرگیرندهٔ آثار متغیرهای مهم و ضروری مخلوط بر عمرخستگی باشد، می‌تواند نیاز به انجام آزمایش‌های طولانی و پرهزینهٔ خستگی را در مرحلهٔ طراحی کاهش دهد. همچنین می‌توان عملکرد مخلوط در شرایط واقعی را تخمین زد [28]. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی عمرخستگی توسط محققین مورد استفاده قرارگرفته است که پرکاربردترین آن‌ها مدل مانیسمیت (Monismith) مطابق رابطهٔ (۵) است که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است:

$$N_f = a(1/\varepsilon \text{ or } 1/\sigma)^b \qquad (۵)$$

که به‌صورت رگرسیون خطی لگاریتم طبیعی به شکل $Ln(Nf)=Ln(a)+bLn(1/\varepsilon)$ به داده‌های عمرخستگی- سطح کرنش یا تنش هریک از مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره برازش داده شد. در این مدل ε مقدار سطح کرنش، σ مقدار سطح تنش، N_f عمرخستگی مخلوط به‌ازای کرنش یا تنش مورد نظر، a و b ضرایب ثابت مدل است.

به‌منظور انجام مدل‌سازی از رگرسیون خطی استفاده شد. لازم به ذکر است که به‌منظور مدل سازی، عمرخستگی به‌دست‌آمده بر اساس دو معیار اشاره شده (معیار کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه و معیار R & B) مورد استفاده قرارگرفت؛ که نتایج آن در جدول (۱۰) ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول (۱۰) ملاحظه می‌شود، ضریب همبستگی خوبی برای تمام مدل‌های توسعه داده شده بر اساس معیار کاهش ۵۰٪ سختی خمشی اولیه در حالت کرنش ثابت به‌دست‌آمده است که نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن مدل‌های برازش داده شده به این داده‌ها است. همچنین به‌غیراز نمونهٔ E-25، شیب تمام خطوط تقریباً یکسان بوده و روند کاهش عمرخستگی با افزایش سطح کرنش مشابه است. با دقت در نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عمرخستگی نمونه‌ها (بر اساس معیار R&B)، مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی بسیار خوبی برای تمام مدل‌های توسعه داده شده وجود دارد که نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن مدل‌های برازش داده شده به این داده‌ها است. همچنین به‌طور مشابه به‌جز نمونهٔ E-25 شیب تمام خطوط تقریباً یکسان بوده و روند کاهش عمرخستگی با افزایش سطح کرنش برای نمونه‌های مختلف تقریباً مشابه است.

اکثر مدل‌های خستگی موجود برای تعیین ضرایب مدل نیازمند انجام آزمایش‌هایی با تعداد سیکل‌های بارگذاری بسیار زیادی است که این امر سبب شده که ارزیابی عملکرد خستگی در مراحل طرح اختلاط، کمتر مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین توسعه‌ی مدل‌هایی که نیاز چندانی به آزمایش‌های طولانی نداشته باشد بسیار مفید خواهد بود. لذا در این بخش ابتدا به معرفی مدل خستگی ارائه شده توسط لی و همکاران [21] در سال ۲۰۱۲ خواهیم پرداخت. سپس مدل ارائه شده در این مقاله که تا حدودی مشابه مدل آن‌ها است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱۰ مدل‌های برازش شده بر اساس هر دو روش

نوع مخلوط	$a(\frac{1}{\varepsilon_{50\%}})^c$	R^2	$a(\frac{1}{\varepsilon_{R\&B}})^c$	R^2
E-25	$3.55E22(\varepsilon)^{-6.329}$	0.9686	$1.67E21(\varepsilon)^{-5.780}$	0.953
E-50	$1.00E20(\varepsilon)^{-5.376}$	0.9194	$1.00E18(\varepsilon)^{-4.566}$	0.9332
E-75	$1.71E21(\varepsilon)^{-5.780}$	0.9513	$2.39E18(\varepsilon)^{-4.673}$	0.9644
E-100	$2.71E21(\varepsilon)^{-5.814}$	0.8973	$7.67E18(\varepsilon)^{-4.854}$	0.9592
L	$5.99E20(\varepsilon)^{-5.780}$	0.8832	$1.34E20(\varepsilon)^{-5.464}$	0.8462

لی و همکارانش [21] در تحقیق خود به‌منظور در نظر گرفتن آثار تنش‌ها و کرنش‌ها بر رفتار خستگی مخلوط، از انرژی تلف‌شدۀ اولیه در آزمایش خستگی استفاده کردند. انرژی تلف‌شده به‌ازای تعداد سیکل بارگذاری مشخص در آزمایش خستگی، معرف انرژی مصرفی جهت ایجاد صدمه در مخلوط است. انرژی تلف‌شده تابعی از تنش، کرنش و زاویۀ فاز مصالح است که ممکن است عامل محرک ایجاد خرابی در مخلوط باشد؛ بنابراین آن‌ها نشان دادند که نسبت انرژی تلف‌شده به دانسیتۀ انرژی تلف‌شدۀ کل (DE_f/DE_{IDT})، می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی باشد. در تحقیق مذکور بعد از ارزیابی مدل‌های مختلف به رابطۀ نهایی (٦) رسیدند:

$$N_f = \frac{1}{a+b(\frac{DE_f}{DE_{IDT}})^c} \qquad (٦)$$

و با مقایسه‌ی این مدل با سایر مدل‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل مذکور با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی خواهد بود و برای به دست آوردن ضرایب مدل نیاز به انجام آزمایش‌های طولانی خستگی نیست و تنها با انجام آزمایش خستگی در تعداد سیکل‌های بسیار کم و به‌دست آوردن انرژی تلف‌شدۀ اولیه و با در اختیار داشتن نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی (مدول دینامیک)، می‌توان نسبت به محاسبه‌ی ضرایب مدل اقدام و یا مستقیماً از مدل توسعه داده شدۀ آن‌ها استفاده نمود.

در این مقاله و با توجه به توضیحات فوق از مدل مذکور برای مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌ها استفاده شد. بدین منظور با استفاده از رگرسیون غیرخطی ضرایب مدل و ضریب همبستگی آن تعیین شد. نتایج این تحلیل نشان داد که ضریب همبستگی به‌دست‌آمده از مدل مذکور بسیار پایین بوده و از دقت لازم برای پیش‌بینی عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سربارۀ برخوردار نیست. لذا مدل‌های مختلف دیگری مورد ارزیابی قرار گرفت و نهایتاً مدل ذیل (رابطۀ ۷) پیشنهاد گردید:

$$N_f = e^{a\left(\frac{DE_f}{DE_{IDT}}\right)+b} \qquad (۷)$$

سپس با انجام رگرسیون غیرخطی ضرایب مدل پیشنهادی به‌ازای درصدهای مختلف سرباره مطابق جدول (۱۱) به دست آمد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل پیشنهادی با ضرایب همبستگی قابل قبول می‌تواند به‌عنوان مدلی مناسب و ساده برای پیش‌بینی عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سربارۀ کورۀ قوس الکتریک مورد استفاده قرارگیرد.

جدول ۱۱ مدل پیشنهادی برای نمونه‌های حاوی سرباره EAF و در حالت کرنش کنترل‌شده

نوع مخلوط	$e^{a\left(\frac{DE_f}{DE_{IDT}}\right)+b}$				
	ضرایب	بر اساس معیار کاهش سختی		بر اساس روش R&B	
		N_{50}	R^2	$N_{R\&B}$	R^2
E-25	a	-4.471E4	0.984	-5.006E4	0.997
	b	15.590		15.450	
E-50	a	-6.241E4	0.981	-6.237E4	0.961
	b	16.024		15.531	
E-75	a	-3.584E4	0.656	-2.076E5	0.721
	b	14.376		20.937	
E-100	a	-5.160E4	0.826	-5.989E4	0.915
	b	15.130		15.263	
L	a	-3.171E4	0.831	-1.069E5	0.909
	B	13.665		16.771	

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌منظور بررسی رفتار خستگی مخلوط آسفالتی حاوی سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک، درصدهای مختلفی از سرباره جایگزین قسمت درشت‌دانهٔ مصالح سنگی آهکی گردید. سپس با استفاده از روش طرح مارشال، درصد قیر بهینه برای هر ترکیب تعیین و آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و خستگی انجام شد که نتایج این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

۱. با افزایش درصد سرباره در مخلوط آسفالتی، مدول برجهندگی آن به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. افزایش ضریب برجهندگی می‌تواند به دلیل شکستگی بیشتر سرباره و در نتیجه قفل و بست بیشتر مصالح سنگی باشد.

۲. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داد که استفاده از سرباره منتج به افزایش معنی‌دار مقاومت کششی مخلوط آسفالتی خواهد شد. این مطلب می‌تواند ناشی از شکستگی بیشتر مصالح سرباره‌ای و درنتیجه قفل و بست بهتر مصالح سنگی و همچنین پیوند قوی‌تر قیر و مصالح سرباره‌ای باشد.

۳. همچنین نتایج این تحقیق حاکی از انرژی شکست بیشتر نمونه‌های حاوی سرباره در قیاس با نمونهٔ شاهد بود که نشان‌دهندهٔ نیروی لازم بیشتر برای ایجاد خرابی در این نوع مخلوط‌هاست و نشان می‌دهد که افزودن سرباره به مخلوط آسفالتی سبب افزایش آستانه‌ی تحمل مخلوط قبل از ترک‌خوردگی شده و به‌بیان‌دیگر نیروی بیشتری برای ترک‌خوردگی آن لازم است.

٤. نتایج آزمایش خستگی نشان داد که با افزودن سرباره به مخلوط، عمرخستگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این افزایش عمر خستگی می‌تواند به دلیل چسبندگی بهتر مصالح سرباره‌ای با قیر باشد که منجر به تقویت چسبندگی در محل تماس قیر و مصالح سنگی و در نتیجه جلوگیری از تغییر شکل و گسترش ترک‌خوردگی خواهد شد.

۵. نتایج مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک با استفاده از مدل مانیسمیت نشان داد که مدل‌های برازش داده شده با

دقت بسیار خوبی قابلیت پیش‌بینی عمرخستگی را خواهد داشت.

٦. نتایج مدل‌سازی خستگی با استفاده از مفهوم دانسیتهٔ انرژی شکست نشان داد که این مدل با دقت قابل قبولی قادر است رفتار خستگی مخلوط را پیش‌بینی کند و بنابراین می‌تواند به‌عنوان مدلی مناسب و ساده برای پیش‌بینی عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سربارهٔ کورهٔ قوس الکتریک مورد استفاده قرارگیرد.

۷. با توجه به این‌که در این پژوهش تنها از یک نوع قیر و یک نوع دانه‌بندی استفاده شده است، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی با استفاده از دانه‌بندی‌ها و قیرهای مختلف، مدل ارائه شده توسعه داده شود.

مراجع

1. Shaopeng, W., Yongjie, X. and Qunshan Y., "Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures", Building and Environment, Vol. 42, pp. 2580–5, (2007).
2. Yongjie, X., Shaopeng, W., Haobo, H. and Jin, Z., "Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture", *Journal of Hazardous Materials,* Vol. 138, pp. 261–8, (2006).
3. Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Ćosić, M., Merle, V., Mioč, B. and Sofilić, U., "EAF steel slag application possibilities in croatian asphalt mixture production" *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 19, (2010).
4. Waligora, J., Bulteel, D., Degrugilliers, P. and Damidot, D., "Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical technique approach", *Materials Characterization*, Vol. 61, pp. 39 – 48, (2010).
5. Kavussi, A. and Modarres, A., "Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1920–7, (2010).
6. You, Z. and Buttlar, W., "Discrete Element Modeling to Predict the Modulus of Asphalt Concrete Mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering,* Special Issue: Micromechanical Characterization And Constitutive Modeling of Asphalt Mixes, pp. 140–6, (2004).
7. Bazin, P. and Saunier, J.B., "Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes", *Second International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements Proceeding,* Ann Arbor, Michigan, (1967).
8. Bagamapadde, U. and Wahhab, S.A., "Optimization of Steel Slag Aggregate for Bituminous Mixes in Saudi Arab", *Journal of Materials in Civil Engineering,* pp. 5-30, (1998).
9. Asi, I.M., Qasrawi, H.Y. and Shalabi, F.I., "Use of Steel Slag Aggregate in Asphalt Concrete Mixes", *Canadian Journal of Civil Engineering,* Vol. 34 (8), pp. 902–11, (2007).
10. Pasetto, M. and Baldo, N., "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 181, pp. 938–48, (2010).

11. Pasetto, M. and Baldo N., "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 3458–68, (2011).
12. Arabani, M., and Azarhoosh A.R., "The Effect of Recycled Concrete Aggregate and Steel Slag on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 1–7, (2012).
13. Kavussi, A. and Jalili Qazizadeh, M., "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging", *Construction and Building Materials*, Vol. 72, pp. 158–166, (2014).

۱٤. نشـریه شـماره ۲۳٤، "آیین‌نامه روسـازی آسـفالتی راه‌های ایران"، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ویرایش اول، (۱۳۹۰).

۱٥. مقدم نیری، محمدرضا.، جلیلی قاضی‌زاده، مرتضی و محمدزاده مقدم، ابوالفضل؛ "*کاربرد سرباره فولاد در پروژه‌های راه سازی*"، اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره قوس الکتریک، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳٤–۱۲۷، (**۱۳۸٦**).

۱٦. توسلی، حمید، "طرح و کنترل بتن آسفالتی گرم"، چاپ اول، انتشارات قلم، (۱۳۷۲).

17. Kavussi, A. and Modarres, A., "A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2252-2259, (2010).
18. Huang, Y.H., "Pavement Analysis and Design", Prentice Hall, New Jersey, (2004).
19. Anagnos, J.N. and Kennedy T.W., "Practical Method of Conducting The Indirect Tensile Test", Center of Highway Research, University of Texas at Austin, Research Report 98-10, Austin, Texas, (1972).
20. Aksoy, A., Samlioglu, K., Tayfur, S., Ozen, H. "Effect of Various Additives on Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp 11-18, (2005).
21. Li, Q., Jong Lee, H. and Kim, T.W., "A simple fatigue performance model of asphalt mixtures based on fracture energy", *Construction and Building Materials*, Vol. 27, pp. 605-11, (2012).
22. Roque, R., Birgisson, B., Sangpetngam, B. and Zhang, Z.W., "Hot mix asphalt fracture mechanics: a fundamental crack growth law for asphalt mixtures", *Journal Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 71, pp. 816–27, (2002).
23. Birgisson, B., Montepara, A., Romeo, E., Roque, R., Roncella, R. and Tebaldi, G., "Determination of fundamental tensile failure limits of mixtures", *Journal Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 76, pp.303–44, (2007).
24. Mamlouk, M., Souliman, M., and Zeiada, W., "Optimum Testing Conditions to Measure HMA Fatigue and Healing Using Flexural Bending Test", TRB annual meeting, (2012).
25. Xie, J., Chen, J., Shaopeng, W., Lin, J. and Wei, W., "Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag", *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 796–803, (2013).
26. Khodary, M., "Evaluation of Fatigue Resistance for Modified Asphalt Concrete Mixtures Based on

Dissipated Energy Concept", PhD thesis, Technische Universität Darmstad, (2010).

27. Rowe, G.M. and Bouldin, M.G., "Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures", Proceedings of 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona, Spain, (2000).
28. Tayebali, A., Rowe, A., G.M. and Sousa, J.B., "Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures", *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists,* Vol. 61, pp. 333-360, (1994).